

Jani Penttilä

BOORIN VAIKUTUS VAIHTOEHTOISIIN BAI- NIITTI- JA MARTENSIITTIKISKOIHIN

Tekniset tieteet
Kandidaatintyö
Tammikuu 2019

TIIVISTELMÄ

JANI PENTTILÄ: Boorin vaikutus vaihtoehtoisin bainiitti- ja martensiittikiskoihin
(Effect of boron on alternative bainite and martensite rails)

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 24 sivua

Tammikuu 2019

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

Pääaine: Materiaalitekniikka

Tarkastaja: Juha Nykänen

Kulutuksen kasvaessa tarve raskaammille ja nopeammille junille kasvaa, minkä vuoksi tarve on myös kulumiskestävämmille ratakiskoille kasvaa. Perinteiset perliittikiskot ovat löytäneet kehityksensä päätepisteen, eikä niistä saada enää kulumiskestävämpiä. Tässä opinnäytetyössä käydään läpi vaihtoehtoisia bainiitti- ja martensiittikiskoja perinteisten perliittikiskojen korvaajiksi. Työssä keskitytään erityisesti boorin vaikutukseen teräksessä.

Opinnäytetyö jakautuu viiteen päälukuun. Ensimmäiseksi on johdanto, jossa esitellään aihe ja ongelma. Toisessa luvussa käsitellään perinteinen perliittikisko. Kolmannessa luvussa taas käsitellään vaihtoehtoiset bainiitti- ja martensiittikiskot sekä boorin vaikutus niihin. Neljännessä luvussa käydään läpi JMatPro-ohjelmalla tehdyt simulaatiokokeet ja viimeiseksi on yhteenveto.

ALKUSANAT

Haluan kiittää kandiohjaajaani Juha Nykästä suuresta määrästä työtunteja, jotka hän uhraasi minun ohjaamiseen opinnäytetyön tekemisessä. Haluan myös osoittaa kiitokseni hyvälle ystävälleni Leevi Kurjelle, joka neuvoillaan auttoi minua työn loppuun saamisessa.

Tampereella, 8.1.2019

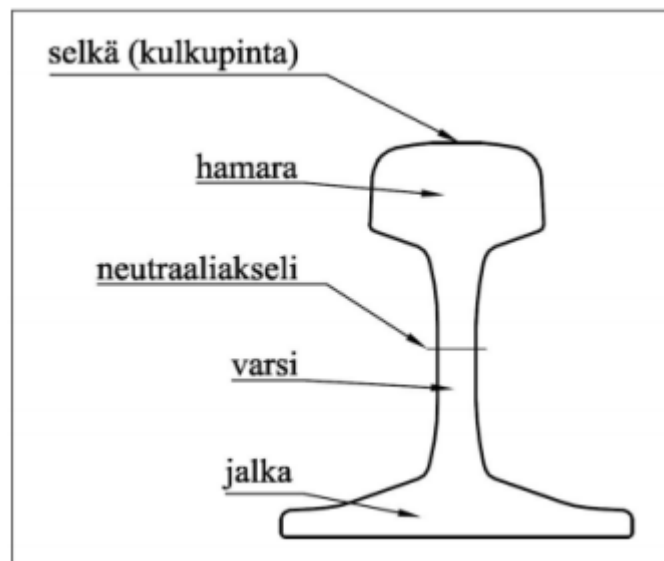
Jani Penttilä

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO.....	1
2.	PERINTEISET PERLIITTIKISKOT.....	3
3.	VAIHTOEHTOISET BAINIITTI- JA MARTENSIITTIKISKOT	4
3.1	Karkenevuus	6
3.2	Karkenevuuteen vaikuttavat tekijät	8
3.2.1	Raekoko	8
3.2.2	Hiilipitoisuus	8
3.2.3	Austenointilämpötila ja aika	9
3.2.4	Seosaineet	9
3.2.5	Boori	9
3.3	Martensiitti lämpötilat	11
3.4	Grossman-koe.....	12
3.4.1	Sammutusteho	13
3.4.2	Ideaalinen kriittinen halkaisija	13
3.5	Jominykoe	15
4.	KOKEELLINEN OSUUS.....	16
4.1	TTT- ja CCT-diagrammit.....	16
4.2	Jominykokeet	19
5.	YHTEENVETO	22
	LÄHTEET	23

1. JOHDANTO

Ratakiskoja on kehitetty 1700-luvulta teollisuuden alkua ajoista lähtien. Kehityksessä on pyritty saamaan kovempia, kulumiskestävämpiä ja murtumissitkeämpiä ratkaisuja muuttamalla teräksen seosta ja ratakiskon muotoa tai muuttamalla lämpökäsittelyjä. Vuosisatojen kehityksen saatossa on todettu kuumavalssattujen C-Mn-perliittikiskojen omaavan ratakiskoilta vaadittavat ominaisuudet [1]. Kuvan 1 mukaiset I-malliset hamarakovetetut perliittikiskot ovatkin yleisimmin käytetyt ratateollisuudessa. Tämä vuosisatojen kehitys on kuitenkin tullut päätökseen, eikä perliittikiskoista saada enää kulumiskestävämpiä seosaineita tai lämpökäsittelyjä muuttamalla. Väestön ja kulutuksen kasvaessa maailmalla tarve raskaammille ja nopeammille junayhteisille kasvaa, jonka myötä tarve kulumiskestävämmille ratakiskoille lisääntyy. Perliittikiskojen saavuttua kehityksensä päähän on tutkittu vaihtoehtoisia mikrorakenteita, kuten bainiittia ja martensiittia, jotka ovat korkean kovuutensa myötä lupaavia vaihtoehtoja.



Kuva 1. Perinteisen kiskon profiili [2].

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tarkastella kulumiskestävämpiä vaihtoehtoja perinteisille perliittikiskoille. Kulumiskestävyyttä voidaan parantaa usealla eri tavalla ja yksi näistä on kovuuden parantaminen. Kovuuttakin voidaan parantaa teräksessä monella eri menetelmällä, kuten karkaisulla, jolloin mikrorakenteeseen muodostuu martensiitti- ja bainiittifaaseja. Martensiitti ja bainiitti ovat kovempia mikrorakenteita kuin perliitti. Eri näisten lämpökäsittelyjen lisäksi teräksen kovuutta voidaan parantaa seosaineilla, kuten molybdeenilla, mangaanilla tai boorilla, joka ei sinänsä suoraan vaikuta kovuuteen vaan

teräksen karkenevuuteen. Karkenevuutta käsitellään tässä opinnäytetyössä ja siihen liittyvät kokeet ja termistö käydään läpi perin pohjin. Eli tarkoituksena on tarkastella seosaineiden vaikutusta teräksen karkenevuuteen, joista boori on erityistarkastelussa.

2. PERINTEISET PERLIITTIKISKOT

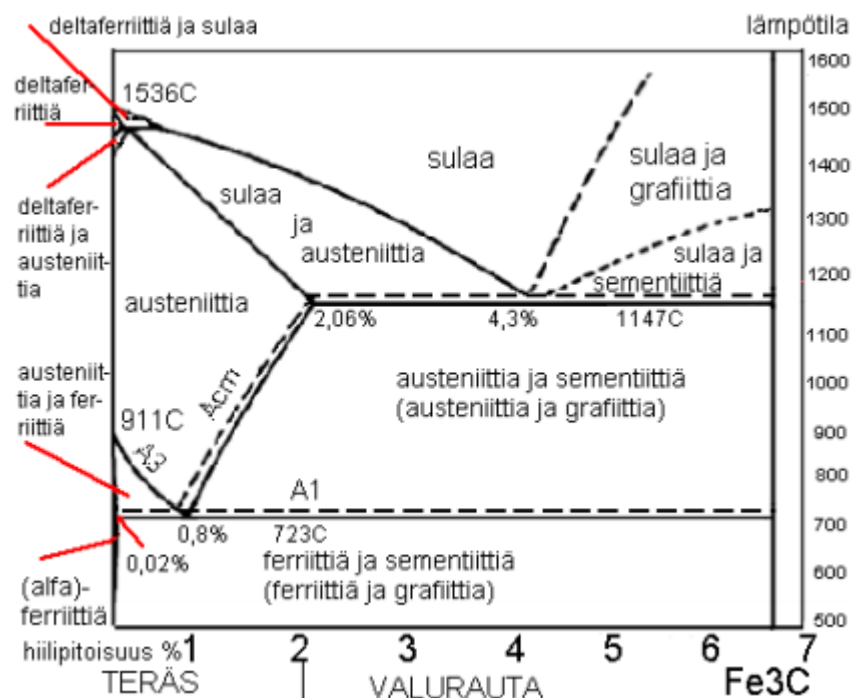
Ratakiskojen perusvaatimuksia ovat hyvä kovuus, kulumiskestävyys ja murtumissitkeys. Käytettävyyden kannalta näistä ominaisuuksista ei voi paljon tinkiä, sillä kiskoja joudutaan vaihtamaan muutenkin vuosittain. Ratakiskoihin kohdistuu junan pyörien aiheuttamaa painetta vierintäliikkeessä. Kun siis tässä opinnäytetyössä puhutaan ratakiskojen kulumiskestävydestä, tarkoitetaan sillä vierintäkulumiskestävyyttä.

Yleisin ratakiskoissa käytetty teräs on perliittinen, koska se täyttää edellä mainitut ominaisuudet. Perliittikiskon kovuus perustuu sen mikrorakenteen ferriitti- ja sementiittilamelleihin. Liukuvassa kulumisessa, kuten junan pyörien liikkeessä, sementiittilamellit orientoituvat teräksen pinnalla kulumisliikkeen suunnan mukaisesti. Tämän seurauksena pehmeä ferriitti puristuu pois tieltä ja teräksen pinnalle jää entistä kovempi ja vierintäkulumiskestävämpi osuus [3, s. 25].

Ratakiskojen kehityksessä pyritään pääosin parantamaan kulumiskestävyyttä, mikä hoidetaan yleensä materiaalin kovuutta lisäämällä [1]. Nostamalla hiilipitoisuutta ja hienontamalla perliitin lamellien välejä saadaan kasvatettua teräksen kovuutta, mikä johtaa parempaan kulumiskestävyyteen [1,4]. Näyttää kuitenkin siltä, että perliittiset teräskiskot kovuudeltaan ovat löytäneet kehityksensä päätepisteen. Teräskiskojen kovuuden ja kulumiskestävyuden parantamiseksi tutkitaan vaihtoehtoisia mikrorakenteita, kuten bainiittia ja martensiittia. Näiden korkean kovuuden omaavien mikrorakenteiden uskotaan tulevaisuudessa korvaavan nykyistä enemmän perliittisiä kiskoja nopeampien ja raskaampien junien yleistyessä maailmalla.

3. VAIHTOEHTOISET BAINIITTI- JA MARTENSIITTIKISKOT

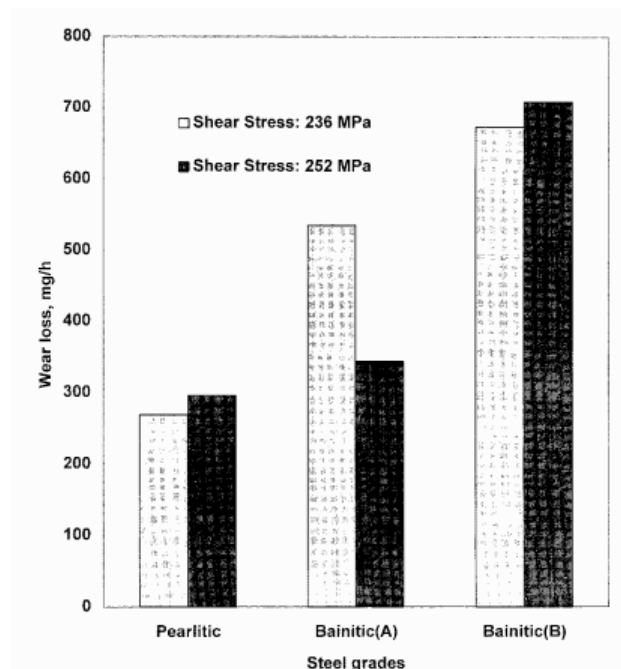
Teräksen karkaisulla muodostuu martensiittinen mikrorakenne. Karkaisussa teräs kuunnetaan austeniitin muodostumislämpötilan yläpuolelle eli austenoidaan [5]. Homogeenisen austeniitin muodostumislämpötila määräytyy teräksen seosaineiden pitoisuuksien perusteella. Kuvassa 2 on esitetty rauta-hiilitasapainopiirros, josta nähdään hiilipitoisuuden vaikutus eri faasien muodostumislämpötiloihin. Kun teräkseen on muodostunut homogeeninen austeniittirakenne, jäähdytetään karkaisunesteellä teräs nopeasti martensiitin muodostamiseksi. Karkaisun jälkeen teräkselle voidaan suorittaa päästö sitkeyden parantamiseksi. Tässä kuitenkin kärsii hieman teräksen lujuus. Parhaan lujuuden saavuttamiseksi teräs täytyy kokonaan muuttaa martensiitiksi. Tämä toteutuu suurella jäähdytysnopeudella, jolloin vältetään muiden faasirakenteiden, kuten ferriitin, perliitin tai bainiitin, ydintyminen austeniitista. Nämä tasapainotilan faasirakenteet muodostuvat diffuusion kautta. Suurilla jäähdytysnopeuksilla diffuusiota ei ehdi tapahtua, minkä seurauksena syntyy martensiittia. Karkaisun tehokkuus perustuu pääosin kahteen tekijään: kappaleen geometriaan sekä teräksen koostumukseen [5]. Oleellisesti vaikuttavat myös karkaisunesteen lämmönsiirtokyky teräksen pinnalla sekä muut ulkoiset tekijät [6]. Näistä kerrotaan tarkemmin myöhemmissä kappaleissa.



Kuva 2. Rauta-hiilitasapainopiirros [7].

Bainiitin muodostuminen on ajasta riippuvaa, ja sitä muodostuu diffuusion kautta. Sen muodostumiseen tarvitaan kuitenkin karkaisun kaltaista lämpökäsittelyä. Perliittiä ja ferriittiä muodostuu hitailla jäähtymisnopeuksilla eikä martensiitin lisäksi bainiittiakaan ehdi muodostua. Bainiitin muodostamiseen tarvitaan tarpeeksi nopea jäähdytysnopeus perliitin ja ferriitin muodostumisen estämiseksi ja tarpeeksi hidas jäähtymisnopeus martensiitin muodostumisen välttämiseksi. Karkaisua ei siis ainoastaan tarvita martensiitin muodostamiseen vaan myös bainiitin muodostamiseen.

Bainiitti- ja martensiittikiskoja on tutkittu jo vuosikymmeniä ja niiden kulumiskestävyyydestä on saatu samantyyppisiä tuloksia. Sawley ja Kristan [4] tekivät tutkimuksen bainiittikiskojen kulumisesta ja väsymisestä, jossa he osoittavat, että bainiittisilla kiskoilla on korkeampi vierintäväsymiskestävyys kuin perliittisillä kiskoilla. Samalla he toteavat, että bainiittiset kiskot ovat kulumiskestävyydeltään vähintään yhtä hyviä kuin perliittiset. Lee ja Polycarpou [1] taas tutkimuksessaan vertailevat perinteistä perliittikiskoja ja paranneltua bainiittikiskoja, jossa he päätyvät myös melko samaan lopputulokseen: bainiittikiskoilla on korkeampi kovuus ja vierintäväsymiskestävyys kuin perliittikiskoilla, mutta kulumiskestävyydeltään eivät juurikaan ole parempia kuin perliittikiskot. Kaikki tutkimukset eivät kuitenkaan anna samoja johtopäätöksiä, kuten Singh et al. [8] kertovat tutkimuksessaan korkealujuisista bainiittikiskoista. Siinä todetaan perliittisten kiskojen olevan kulumiskestävyydeltään bainiittikiskoja huomattavasti parempia, mutta bainiittikiskon kulumiskestävyys paranee kuorman kasvaessa. Kuvassa 3 on esitettyä heidän tutkimustuloksiaan diagrammina.



Kuva 3. Singh et al. vertasivat perliittikiskoja eri seoksisiin bainiittikiskoihin [8].

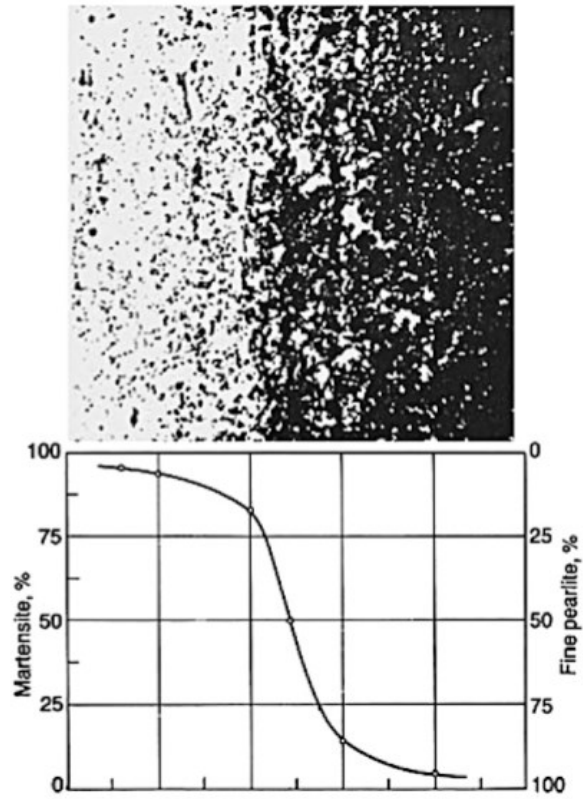
Martensiittikiskoja on tutkittu käsitellyistä kiskotyypeistä vähiten. Martensiittikiskoilla on todettu yleisesti olevan alhaisempi kulumiskestävyys kuin perliitti- tai bainiittikiskoilla [3, s. 9]. Martensiittiteräksille joudutaan yleensä suorittamaan päästö mekaanisten ominaisuuksien parantamiseksi, mikä tekee siitä taloudellisesti huonon vaihtoehdon. Vaikka martensiittikiskot eivät ole antaneet lupaavia tuloksia, bainiittikiskot ovat osoittautuneet koviksi kilpailijoiksi perliittikiskoille [1,4,8]. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään molempien, martensiitin ja bainiitin, muodostumista karkenevuuden näkökulmasta.

3.1 Karkenevuus

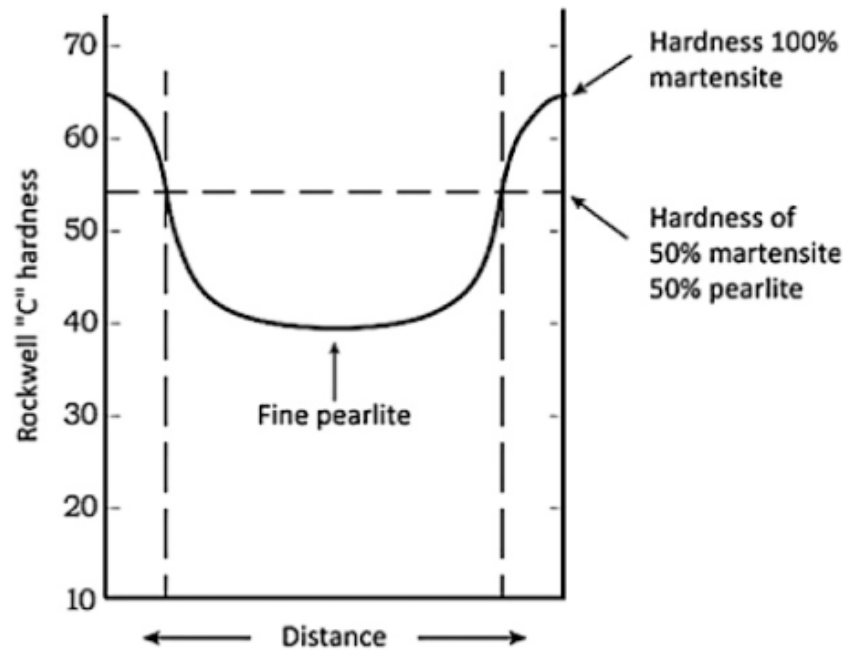
Paksu terästanko jäähtyy hitaampaa kuin ohut terästanko samalla toimenpiteellä. Ohut tanko täten saavuttaa helpommin martensiittisen rakenteen. Tietyt seosaineet taas hidastavat muiden faasirakenteiden syntyä, mikä alentaa kriittistä jäähtymisnopeutta martensiitin syntymiselle. Jos kriittistä jäähtymisnopeutta ei saavuteta, teräskappaleeseen muodostuu sisäosissa martensiitin sijaan ferriittiä, perliittiä tai bainiittia jäähtymisen hitauden perusteella. [5]

Teräksen kykyä muodostaa martensiittia karkaisun aikana kutsutaan karkenevuudeksi. Standardien mukaisilla terästangoilla tämä voidaan esittää etäisyytenä pinnasta, jonne on muodostunut 50 %:n pitoisuudella martensiittia standardien mukaisella karkaisulla. Kyseistä etäisyyttä kutsutaan kriittiseksi halkaisijaksi D_{crit} . Tämä voidaan myös ilmaista karkenemissyvyytenä. [5]

50 % rajan valintaan karkaistulle kappaleelle on kaksi syytä: visuaaliset muutokset mikrorakenteessa mikroskooppikuvissa sekä kovuusarvojen muutokset kappaleessa. Kuvassa 4 on esitettyinä mikrorakenteen visuaaliset muutokset, josta eritoten nähdään martensiitin ja perliitin alueet rajattuna. Martensiitti näkyy mikroskooppikuvassa vaaleana alueena, kun taas perliitti esiintyy tummempana. [6] Perliitin ja martensiitin 50 %:n raja voidaan helposti tunnistaa, jolloin kriittisen halkaisijan mittaaminen terästangosta on mahdollista. Kuvassa 5 on esitettyinä terästangon kovuusarvojen muutoksia suhteessa mittauspisteen etäisyydestä keskipisteeseen. Keskellä on 100 % perliittiä ja reunoilla 100 % martensiittia. Kovuusarvojen muutokset kappaleessa ovat taas suuria perliitin ja martensiitin 50 %:n rajalla, mikä on helppo tunnistaa kovuusmittauksissa. Muutokset mikroskooppikuvissa ja kovuusmittauksissa ovat helposti nähtävissä 50 %:n rajalla, minkä vuoksi sitä käytetään kriteerinä kriittiselle halkaisijalle [6].



Kuva 4. Muutos martensiitista perliittiseen mikrorakenteeseen karenneen ja karke-
nemattoman alueen välillä [6].



Kuva 5. Kovuusarvojen muutokset terästangossa [6].

3.2 Karkenevuuteen vaikuttavat tekijät

Kuten edellä mainittiin, karkenevuuden tehokkuus riippuu eritoten kappaleen geometriasta ja jäähdytysnopeudesta. Karkenevuus on myös kaikille terästyypeille karakteristinen ominaisuus, joka riippuu teräksen raekoosta, austenointilämpötilasta, austenointiajasta sekä hiilien ja muiden seosaineiden pitoisuuksista. [6]

Seuraavaksi käydään läpi edellä mainittujen tekijöiden vaikutuksia karkenevuuteen yksi kerrallaan. Seosaineiden lisäksi boorille on erillinen kappale, koska boori on tässä opinäytetyössä erityistarkastelussa.

3.2.1 Raekoko

Diffuusion kautta tapahtuvat faasimuutokset tunnetusti heikentävät teräksen kovuutta. Nämä faasimuutokset alkavat heterogeenisesti austeniitin raerajoilta. Mitä enemmän raerajoja on tilavuutta kohden, sitä enemmän ferriittiä ja perliittiä voi muodostua. Suurilla raekoilla on vähän raerajoja tilavuutta kohden, ja siten stabiileilla faaseilla on hankalampaa muodostua. [6]

Raekoon tiedetään tunnetusti vaikuttavan kovuuteen muutenkin kuin karkenevuuden kautta. Dislokaatiot liikkuvat mikrorakenteessa rakeiden sisällä ja raerajat ovat suuria esteitä niille. Mitä pienempi raekoko, sitä suurempi kovuus. Tässä menevät hyödyt ristiin teräksen karkenevuuden ja kovuuden suhteen. Martensiittia on helpompaa muodostaa suurilla raekoilla, mutta suuret raekoot tunnetusti helpottavat dislokaatioiden liikettä, jolloin lopullinen kovuus alenee.

3.2.2 Hiilipitoisuus

Hiilen lisääminen on halvimpia keinoja kasvattaa karkenevuutta. Hiilipitoisuuden kasvattamisella on kuitenkin rajoituksia, kuten teräksen sitkeyden heikkeneminen huoneenlämpötilassa. Korkea hiilipitoisuus samalla altistaa teräksen karkaisun jälkeisille vääristymille ja murtumille. Martensiittilämpötila M_s on sitä matalampi, mitä enemmän hiiltä teräs sisältää. Alhaisissa martensiittilämpötiloissa teräs on vähemmän plastinen ja siten muokautuu huonommin suuriin tilavuuden muutoksiin martensiitin muodostumisessa. [6]

Hiilipitoisuudella on siis suuri vaikutus karkenevuuteen, mutta ainoastaan austeniittiin liennut hiili edistää sitä. Ainoastaan liennut osa kaikesta hiilestä osallistuu martensiitin muodostumiseen. [9, s. 213] Tämän takia austenoinnin tarvitsee olla tarpeeksi tehokas, mistä kerrotaan enemmän seuraavassa kappaleessa.

3.2.3 Austenointilämpötila ja aika

Austenoinnin tarkoituksena on liuottaa yhdisteitä, kuten karbideja, ja saada aikaan homogeeninen mikrorakenne. Homogeenisessa mikrorakenteessa hiili ja muut seosaineet ovat tasaisesti jakautuneet. Jos karbidit jäävät liukenematta, kumpikaan yhdisteen hiilestä tai seosaineesta ei voi parantaa karkenevuutta. Sen sijaan karkaisun aikana liukenemattomilla karbideilla on taipumusta edistää diffuusion kautta tapahtuvaa faasimuutosta, mikä heikentää karkenevuutta. [6]

Austenointilämpötila vaikuttaa karbidien liukenemisen ohella myös raekokoihin. Korkeissa lämpötiloissa rakeista tulee suurempia ja siten parantaa karkenevuutta. On kuitenkin tärkeää suorittaa austenointi niin pienissä lämpötiloissa, kuin mahdollista, sillä liian korkeat lämpötilat aiheuttavat teräksessä mm. hapettumista, hiilikatoa ja mittojen vääristymiä. [6]

3.2.4 Seosaineet

Jäähdytyksessä austeniitilla on taipumusta hajaantua ferriitiksi ja sementiitiksi. Seosaineet taas liukenevat ferriitti- ja sementiittifaaseihin, sen mukaan, ovatko ne karbideja muodostavia aineita vai ei. Karbideja muodostavat aineet liukenevat sementiittiin ja ei-karbideja muodostavat aineet liukenevat ferriittiin. Karbideja muodostavat aineet suosivat sementiittiä ja muut suosivat ferriittiä. Seosaineet ja karbidit jakautuvat näin diffuusion myötä ferriitin ja sementiitin välille. Diffuusiokyky on seosaineilla alhaisempi kuin hiilellä, mikä johtaa ferriitin (ja samalla perliitin) hitaampaan muodostumiseen. [6]

Teräksissä karkenevuuden parannuksessa usein käytettyjä seosaineita ovat Mn, Si, Cr, Mo ja B. Näillä seosaineilla on booria lukuun ottamatta muitakin käyttötarkoituksia karkenevuuden ohella, kuten lujuus ja kovuus [10].

3.2.5 Boori

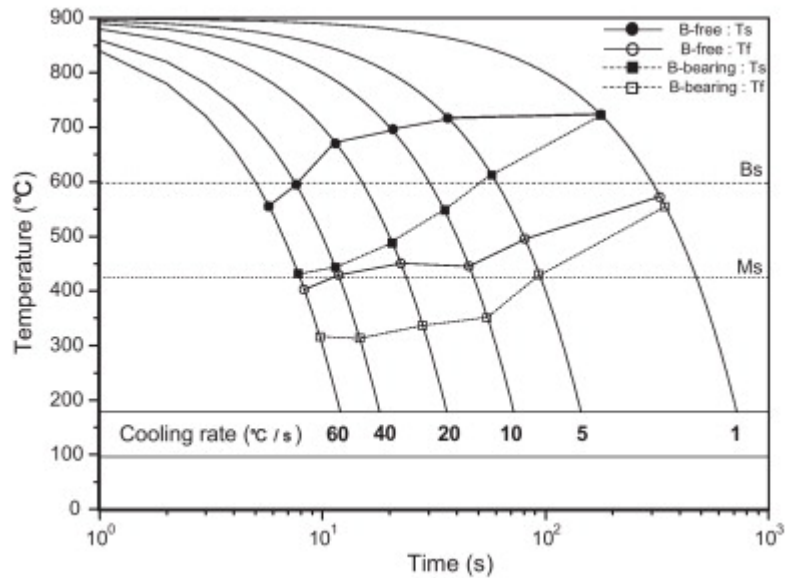
Boorin ainoa käyttötarkoitus teräksissä on karkenevuuden parantaminen. Sitä käytetään eritoten niukkahiielisissä teräksissä. Jo pienissä määrin boorilla on merkittävät vaikutukset teräksen karkenevuuteen, mikä tekee siitä tehokkaan ja taloudellisesti kannattavan seosaineen. Boori liukenee austeniittiin niukasti, myös eutektisessä lämpötilassa, minkä vuoksi se sijaitsee pääosin raerajoilla [6]. Boorin segregatio austeniitin raerajoilla alentaa raerajaenergiaa, mikä estää ferriitin muodostumista. Tästä seuraa alempien lämpötilafaasien, kuten bainiitin ja martensiitin, muodostumista [11]. Sen vaikutus kasvaa pienillä raekoilla, jolloin on enemmän raerajoja tilavuutta kohden [6]. Tässä raekoon ja boorin hyödyt menevät ristiin, sillä pienet raekoot heikentävät karkenevuutta.

Riippuen lämpökäsittelystä boorin segregatio raerajoille voi olla joko tasapainotilassa tai ei-tasapainotilassa muodostunutta. Tasapainosegregatio johtuu matriisiin ja raerajoihin liuenneista atomeista, joilla on eroja Gibbsin vapaaenergioissa. Ei-tasapainosegregatio yleistyy korkean lämpötilan jäähtyöksissä ja samalla tasapainosegregaation vaikutus vähenee. Korkean lämpötilan jäähtyksen seurauksena syntyy supersaturoituneita vakansseja, jotka diffundoituvat vakanssinieluihin, kuten raerajoihin [11, 12]. Ne voivat vetää mukanaan liuenneita atomeja, minkä seurauksena tapahtuu ei-tasapainosegregaatiota [11].

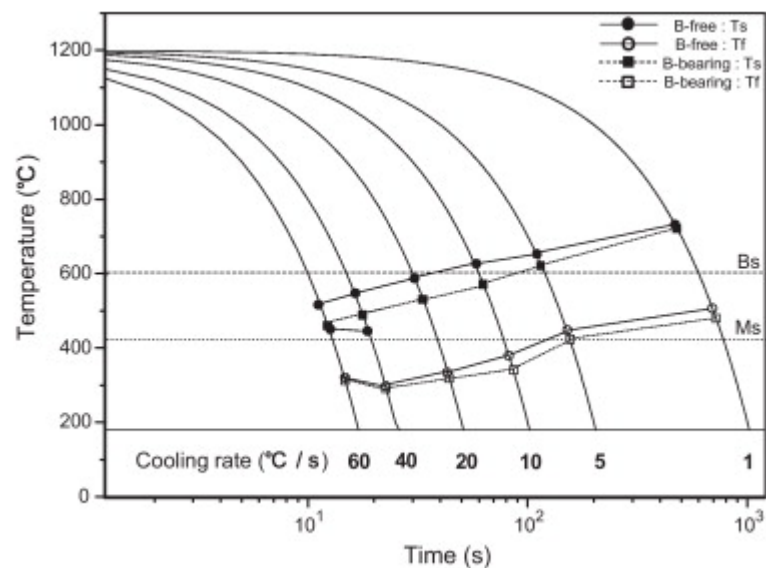
Booriakaan ei voi lisätä loputtomiin, vaan tulee vastaan pitoisuus, jolla alkaa muodostua $M_{23}(C,B)_6$ (M tarkoittaa metalliatomien yhdistelmää) boorikarbidia austeniitin raerajoille. Noin 30 ppm:n kohdalla boorikarbideista alkaa muodostua tarpeeksi suuria olemaan ferriitin ja perliitin ydintymiskohtia, mikä luonnollisesti johtaa karkenevuuden heikkenemiseen [3, 12]. Boorikarbidien muodostumiseen vaikuttaa myös austenointilämpötila ja pitoaika. Mitä korkeampi austenointilämpötila ja pitoaika, sitä enemmän boorikarbideja muodostuu raerajoille [13].

Kuvissa 6-7 on esitettyä boorin vaikutusta bainiitin ja martensiitin muodostumiseen eri austenointilämpötiloissa. Kuvassa 6 on karkaisutulokset 900 °C austenointilämpötilasta eri jäähtytysnopeuksilla. Pallopisteet ovat boorittoman teräksen mittaustuloksia ja neliöpisteet taas booria sisältävän teräksen mittaustuloksia. Tummat pisteet kertovat austeniitin hajoamisen lähtöpisteen ja vaaleat pisteet kertovat austeniitin hajoamisen päätepisteen. B_s ja M_s katkoviivat ovat lämpötiloja bainiitin ja martensiitin muodostumiselle. Boorittomalla teräksellä ehtisi muodostua martensiittia 40 °C/s jäähtytysnopeudella, kun taas booria sisältävällä teräksellä jo 5 °C/s jäähtytysnopeudella. Loput 5 °C/s jäähtytysnopeudella käsitelty booriteräs on lähes kokonaan bainiittia. Boorin tuoma etu huomataan 5 -20 °C/s jäähtytysnopeuksilla. Tätä korkeammilla jäähtytysnopeuksilla boorin tuoma etumatka kapenee hiljalleen. Kuvassa 7 on suoritettu samat toimenpiteet kuin edellisessä kuvaajassa, mutta austenointilämpötilana on 1200 °C. Kuten kuvaajasta nähdään, boorin vaikutus heikkenee merkittävästi austenointilämpötilan kasvaessa. [12]

Boorilla on suuri taipumus yhdistyä hapen ja typen kanssa. Nämä yhdisteet eivät liukene austeniittiin korkeimmassakaan austenointilämpötilassa. Näiden yhdisteiden syntymistä voidaan välttää lisäämällä teräkseen ennen booria muita pelkistysaineita ja nitridin muodostajia, esimerkiksi alumiinia ja piitä, jotka yhdistyvät hapen kanssa tai titaania ja zirkoniumia, jotka yhdistyvät typen kanssa. [6] Maksimaalisen hyödyn saaminen boorista edellyttää kyseisen alkuaineen segregaaion ja erkauman hallitsemista. Nämä yleensä riippuvat seosainekoostumuksesta, austenoinnista, jäähtytysnopeudesta sekä austeniitin muokkautumisesta [12].



Kuva 6. Karkaisuarvoja eri jäähdytysnopeuksilla 900 °C:n austenointilämpötilasta. [12]

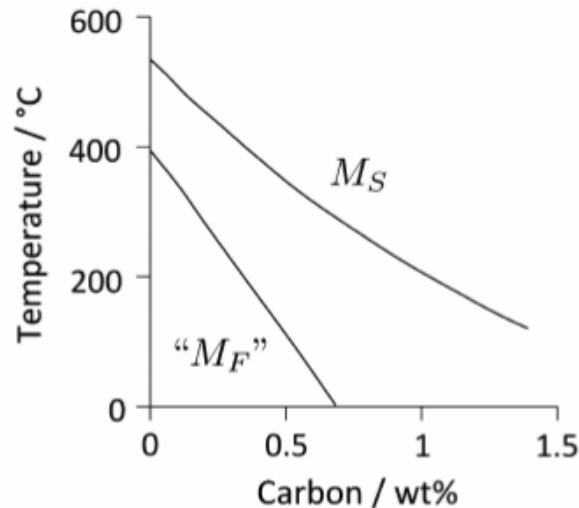


Kuva 7. Karkaisuarvoja eri jäähdytysnopeuksilla 1200 °C:n austenointilämpötilasta. [12]

3.3 Martensiitti lämpötilat

Martensiitin muodostuminen alkaa, kun saavutetaan martensiittilämpötila M_s . Toisin kuin ferriitti, perliitti ja bainiitti, joita muodostuu vakioämpötiloissa, martensiittia muodostuu lisää vain lämpötilan laskiessa. Martensiitin muodostumisen ajatellaan tulleen päätökseen, kun saavutetaan martensiitin loppulämpötila M_f . Monet seosaineet alentavat M_s - ja M_f -arvoja, mutta erityisesti hiilellä on suuri vaikutus niihin. Kuvassa 8 on esitettyä martensiittilämpötilojen muutos hiilipitoisuuden mukaan. Tarpeeksi suurilla hiilipitoisuuksilla

silla M_f on huoneenlämpötilaa alhaisempi. Tällöin suoritetaan martensiitin loppulämpötilan saavuttamiseksi ns. "pakkaskarkaisu". Mikäli karkaisua ei suoriteta martensiitin loppulämpötilaan asti, teräksen rakenteeseen jää ns. jäännösausteniittia, joka ei ole kerennyt hajaantua. [14] Kuvasta 8 nähdään, että mitä suurempi hiilipitoisuus, sitä suurempi on jäännösausteniitin osuus karkaistun teräksen rakenteesta [5].



Kuva 8. Martensiitin alkamis- ja loppumislämpötilat M_s ja M_f hiilipitoisuuden funktioina [5]

Martensiitin muodostuminen on ajasta riippumatonta, eikä sitä muodostu lisää, ellei lämpötilaa lasketa. Yhtälö 1 on Koistisen ja Marburgerin yhtälö, joka kuvaa martensiitin etenemistä M_s :n alapuolella. T_Q on lämpötila, johon näyte on jäädytetty ja $V^{\alpha'}$ on muodostuneen martensiitin tilavuusosuus [5]. Kaavasta nähdään, että martensiittia ei muodostu lisää, ellei lämpötilaa alenneta. Myöskään perliitin ja bainiitin muodostumiselle atomeilla ei ole enää tarpeeksi kineettistä energiaa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että terästä voidaan pitää M_s :n alapuolella samassa lämpötilassa tuntikausia, eikä mikrorakenne muutu siitä miksikään.

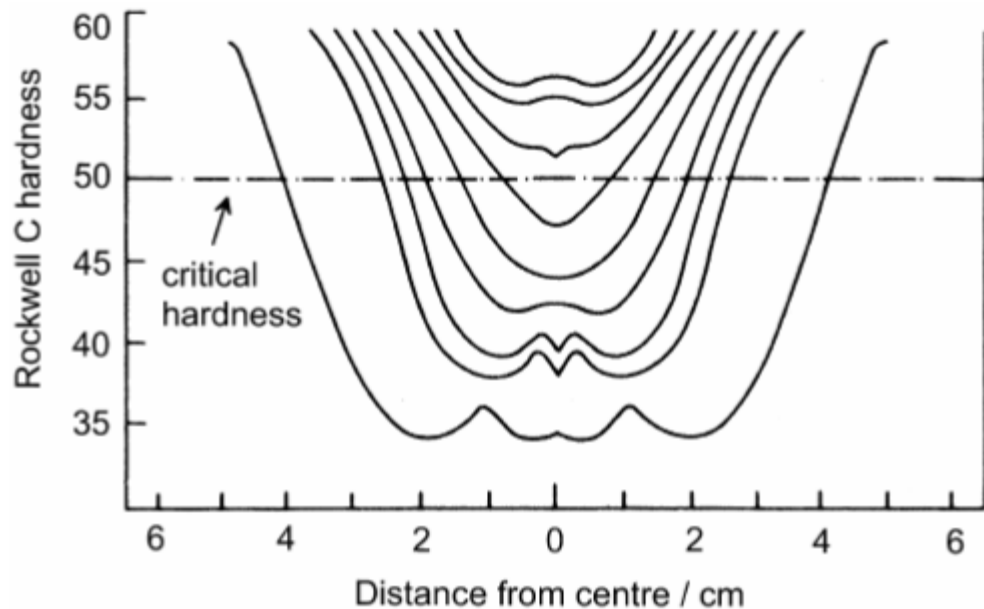
$$1 - V_V^{\alpha'} = \exp\{\beta(M_s - T_Q)\} \quad \text{jossa } \beta \approx -0.011 \quad (1)$$

3.4 Grossman-koe

Grossman-koe on teräksen karkenevuuden tarkasteluun luotu menetelmä, jossa eri paksuisia terästankoja karkaistaan tietyllä jäähtymisnopeudella [9]. Jokaiselle terästangolle suoritetaan samat lämpökäsittelyt ja jäähtytykset. Tämän jälkeen suoritetaan kovuusmittauksia terästankojen poikkileikkauksiin, joista voidaan päätellä teräksen karkenevuutta. Mitä kovempaa teräs on kussakin mittauspisteessä, sitä enemmän matalan lämpötilan faaseja mikrorakenne sisältää. [5]

Kuvassa 9 on esitettyä kovuusdataa eri paksuisista terästangoista. Kuvaajassa poikittainen katkoviiva on kriittinen kovuus. Katkoviivan kohdalla nähdään kunkin terästangon

D_{crit} , joka siis kertoo missä vaiheessa mikrorakenne on 50% martensiittia. Paksuilla terästangoilla lämmönsiirto ei ole keskellä riittävän nopeaa, jolloin kovuus jää alle kriittisen kovuuden. Ohuilla tangoilla jäähtyminen tapahtuu niin nopeasti, että kovuus on keskeltäkin kriittistä kovuutta korkeampi. Esimerkiksi 2 cm paksuinen tanko, kolmas käyrä kuvaajan keskeltä, on keskeltäkin kriittisen kovuuden yläpuolella. Sitä paksummat tangot ovat halkaisijaltaan suurempia, kuin D_{crit} . [5]



Kuva 9. Kovuusdataa eri paksuista terästangoista. [5]

3.4.1 Sammutusteho

Karkaisu voidaan suorittaa muillakin väliaineilla veden lisäksi, kuten öljyllä tai suolaliuoksilla. Nämä tietysti vastaanottavat ja johtavat lämpöä eri nopeuksilla. Käytännössä tarkoittaa sitä, että eri karkaisunesteillä karkaistu teräs antaa eri arvoja kriittiselle halkaisijalle D_{crit} [9].

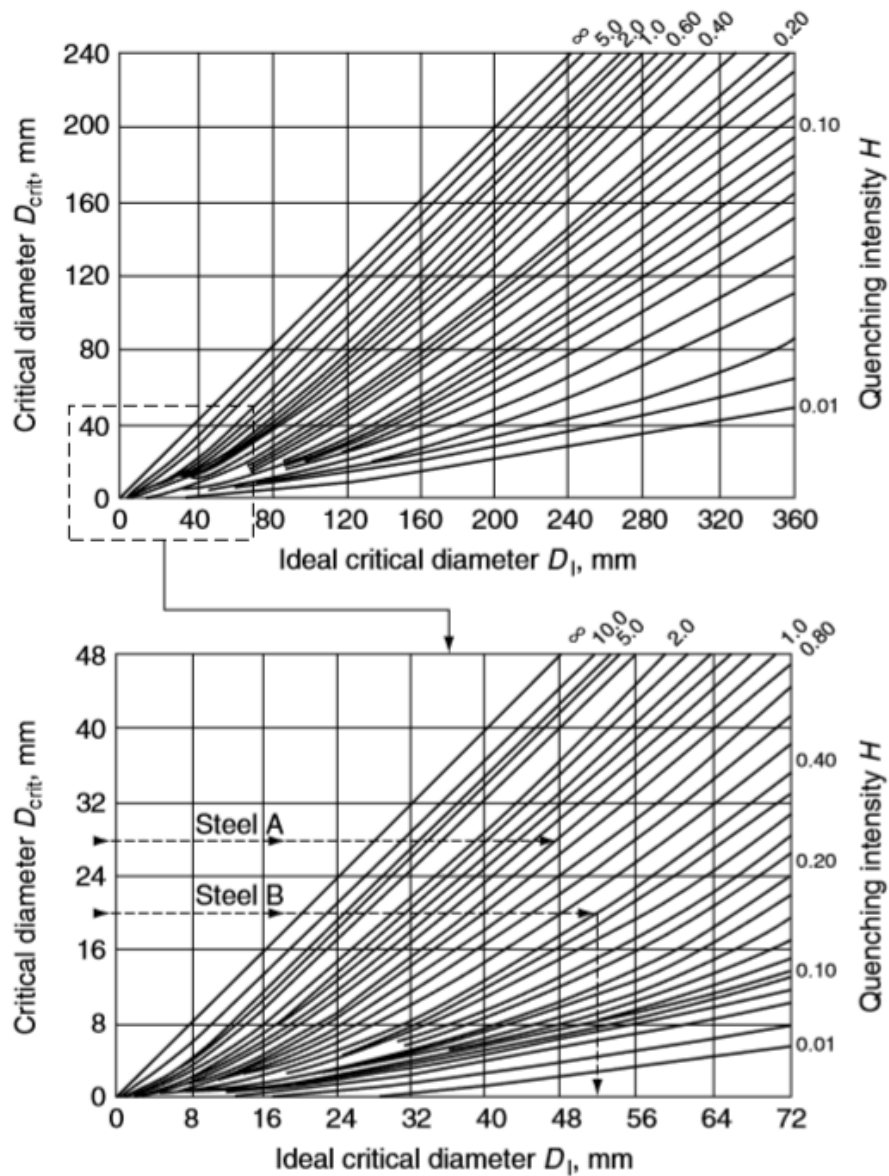
Jotta karkaisuja eri väliaineilla voitaisiin vertailla keskenään, on kehitetty sammutustehoasteikko, joka on esitettyä kuvassa 10. Sammutusteho H ilmaisee karkaisunesteen kykyä karkaista teräskappaleita. Sammutustehon H määrittämiseen tarvitaan D_{crit} :n lisäksi uusi muuttuja D_I , joka tunnetaan nimellä ideaalinen kriittinen halkaisija. [6, 9]

3.4.2 Ideaalinen kriittinen halkaisija

Kriittinen halkaisija D_{crit} on verrannollinen sammutustehoon. Mitä suurempi H , sitä suurempi on D_{crit} . Tästä syystä eri karkaisunesteissä sammutettuja teräksiä ei voida verrata karkenevuudeltaan keskenään. Jotta D_{crit} saataisiin riippumattomaksi sammutustehosta H , käytetään ideaalista kriittistä halkaisijaa D_I . D_I on määritelty halkaisijana, jossa karkaisematon alue katoaa, jos teräskappaleelle suoritettaisiin ideaalinen karkaisu. Ideaalilla

karkaisulla tarkoitetaan ideaalilla karkaisunesteellä suoritettua karkaisua, jossa D_{crit} ylittää teräskappaleen ytimeen saakka. Ideaali karkaisuneste johtaa lämpöä pois kappaleen pinnalta yhtä nopeasti kuin sinne siirtyy kappaleen ytimestä. [9]

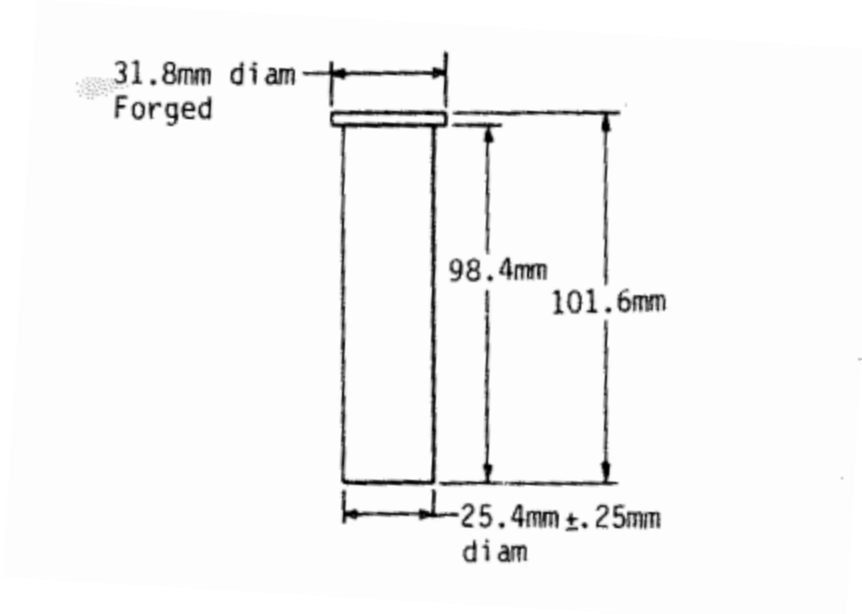
Kuva 10 on diagrammi kriittisen halkaisijan D_{crit} , ideaalikriittisen halkaisijan D_I ja sammutustehon H suhteesta. Diagrammissa on useita käyriä, jotka kuvaavat eri sammutustehoja. Kun tiedetään sammutusteho H ja kriittinen halkaisija D_{crit} , saadaan selville vastaava ideaalikriittisen halkaisijan D_I arvo. Täten eri karkaisunesteellä karkaistuja teräksiä voidaan verrata keskenään. [9]



Kuva 10. Diagrammi sammutustehon H , kriittisen halkaisijan D_{crit} ja ideaalikriittisen halkaisijan D_I suhteesta. [9]

3.5 Jominykoe

Jominykoe on Grossman-kokeen pohjalta kehitetty menetelmä, jolla voidaan mitata teräksen karkenevuutta. Kyseisessä kokeessa kuvan 11 mallista austenoitua terästankoa karkaistaan vesisuihkulla toisesta päästä, ja martensiittirakenteen muodostumista tarkastellaan tangon pituussuunnassa [15]. Kuten Grossman-kokeessa, mitä kauemmas mennään sammutuspinnasta, sitä hitaampaa jäähtyminen on eli sitä vähemmän muodostuu martensiittirakennetta. Jominykoe on Grossman-koetta paljon käytännöllisempi, sillä siinä tarvitaan vain yksi terästanko mittaustulosten saavuttamiseksi, kun taas Grossman-kokeessa käytetään useampaa eri paksuista terästankoa, mikä samaan aikaan vie sekä rahaa että aikaa.



Kuva 11. Testikappaleen mitat A255-standardin mukaan. [15]

Jominykoe on silti kallis menetelmä, joka sisältää paljon virhemahdollisuuksia. Aikojen kuluessa on tehty lukematon määrä Jominykokeita, joiden pohjalta on kehitetty laskenta-menetelmiä ja -kaavoja, jotka antavat tarkempia tuloksia kuin yksittäiset Jominykokeet [5 s.64]. JMatPro on esimerkki kehitetystä simulaatio-ohjelmasta, jolla voi piirtää Jominykoekuvaa annettujen seosainekoostumusten pohjalta [16].

4. KOKEELLINEN OSUUS

Työssä on käsitelty karkenevuuteen vaikuttavat tekijät sekä karkenevuuden mittaustavat. Seuraavaksi käymme läpi kokeellisen osuuden, jossa verrataan keskenään perinteistä perliittiä ja bainiitti/martensiittia. Vertailussa on käytetty JMatPro-ohjelmaa, jonka avulla on piirretty kuvaajat Jominykokeille sekä TTT- ja CCT-diagrammeille. Ohjelma piirtää kuvaajat annettujen parametrien perusteella, joita ovat mm. austenointilämpötila, raekoko ja seosaineet. Austenointilämpötila ja raekoko olivat kaikissa simulaatiokokeissa samanarvoisia. Seosaineet ja niiden pitoisuudet sen sijaan muuttuivat. Kuvaajat on muodostettu taulukossa 1 esitetyille teräskoostumuksille, joista ensimmäinen on perinteisten perliittikiskojen (P) koostumus ja jälkimmäinen on bainiittikiskon koostumus, joka tunnetaan nimellä J6 [1]. J6 on osoittautunut lupaavaksi vaihtoehdoksi aikaisemmissa tutkimuksissa. J6 on alun perin tarkoitettu bainiittikiskoille, mutta näissä kokeissa tarkastellaan myös martensiitin muodostumista [1].

Taulukko 1. Perinteisen perliitin ja bainiitin/martensiitin koostumukset.

	C(wt%)	Mn(wt%)	Si(wt%)	Cr(wt%)	B(wt%)
Perinteinen perliitti (P)	0.79	0.91	0.66	0.47	-
Bainiitti (J6)	0.26	2.00	1.81	1.93	0.003

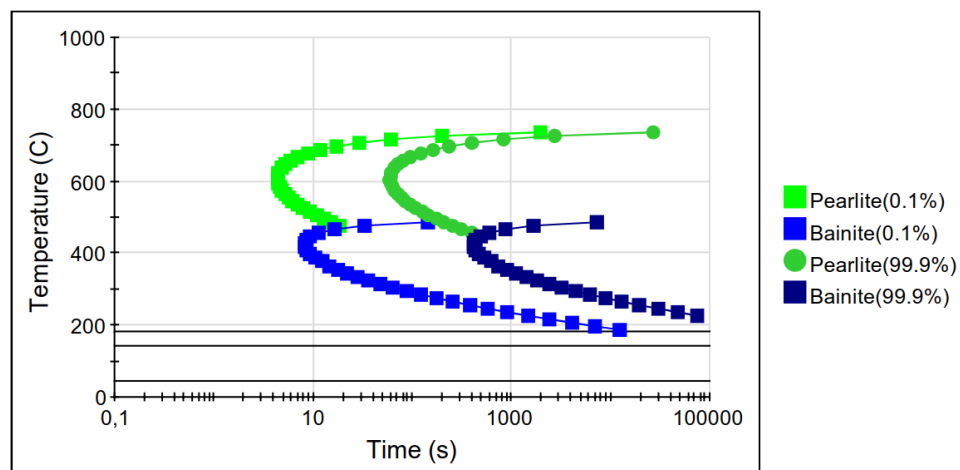
Kyseisissä koostumuksissa hiili lisää teräksen kovuutta ja kulumiskestävyyttä, minkä takia sitä on runsaasti perliittisissä kiskoissa. Mangaani ja kromi molemmat lisäävät teräksen kovuutta, kulumiskestävyyttä ja karkenevuutta. Mangaani toimii myös pelkistysaineena, minkä vuoksi sitä käytetään suurissa määrin etenkin bainiitissa ja martensiitissa. Pii lisää kovuutta ja toimii nitridin muodostajana tai mangaanin tavoin pelkistysaineena. Boori on puhtaasti karkenevuutta varten ja se tarvitsee runsaasti edellä mainittuja nitridin muodostajia sekä pelkistysaineta toimiakseen tehokkaasti.

4.1 TTT- ja CCT-diagrammit

TTT-diagrammi (time-temperature-transformation) on kuvaaja, jossa tarkastellaan teräksen faasimuutoksia eri lämpötiloilla ajan suhteen. TTT-diagrammissa faasimuutokset tapahtuvat isotermisesti eli teräskappale on vakio lämpötilassa. CCT-diagrammissa (continuous cooling transformation) nimensä mukaisesti kuvaaja, jossa terästä on käsitelty tasaisesti laskevalla lämpötilalla. CCT-diagrammista saadaan käsitys, mitä faasirakenteita muodostuu milläkin jäähtymisnopeudella.

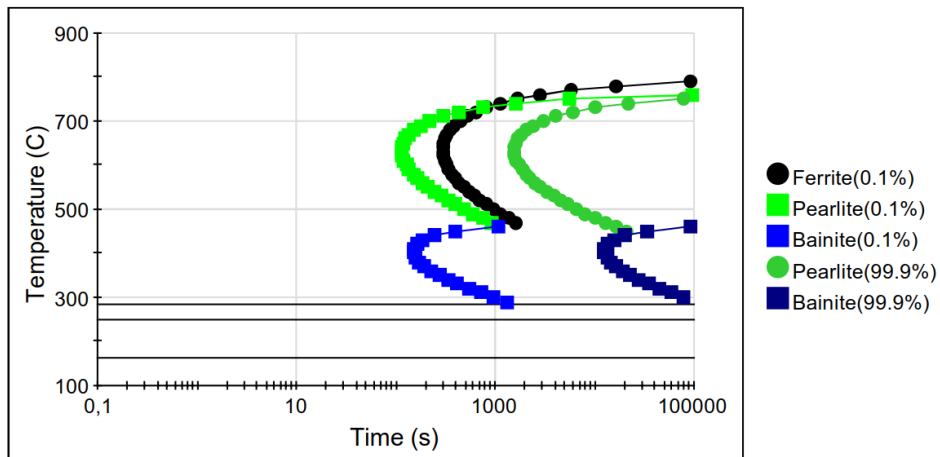
Kuvissa 12 ja 13 on esitetty TTT-diagrammit tarkasteltaville teräskoostumuksille P ja J6. Aivan ensimmäiseksi kuvista voidaan mainita kuvan 8 osoittama hiilipitoisuuden vaikutus martensiittilämpötiloihin. Kuvassa 12 perliitillä M_s on $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, kun taas kuvassa 13 martensiitilla M_s on $280\text{ }^{\circ}\text{C}$. Enemmän kyseisissä kuvissa kuitenkin herättää huomiota perliitti- ja bainiittifaasien muodostumiskäyrien sijainnit. P-seoksessa austeniitti alkaa hajoamaan $600\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa kuuden sekunnin pitoajan jälkeen perliitiksi ja minuutin pitoajan jälkeen mikrorakenne on muuttunut kokonaan perliittiseksi. $400\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa kahdeksan sekunnin pitoajan jälkeen lähtee bainiitti muodostumaan. Jotta teräs olisi kokonaan bainiittia, täytyisi kyseisessä lämpötilassa terästä pitää kuusi minuuttia. J6-seoksessa faasien muodostumiskäyrät ovat siirtyneet diagrammissa pitemmille pitoajoille. Perliittiä ja bainiittia muodostuu edelleen samoilla lämpötiloilla, mutta huomattavasti hitaammin. $600\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa perliittiä alkaa muodostua kahden minuutin pitoajan jälkeen ja 25 minuutin jälkeen teräs olisi kokonaan perliittistä. Perliitin pitkien muodostumisaikojen vuoksi bainiittinen mikrorakenne on helppoa saavuttaa. $400\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa bainiitin muodostuminen alkaa kolmen minuutin jälkeen ja kolmen tunnin kuluessa teräs olisi kokonaan bainiittista. Näistä käyräpoikkeamista nähdään boorin suuri vaikutus teräksen karkenevuuteen.

TTT



Kuva 12. P-teräksen logaritminen TTT-diagrammi.

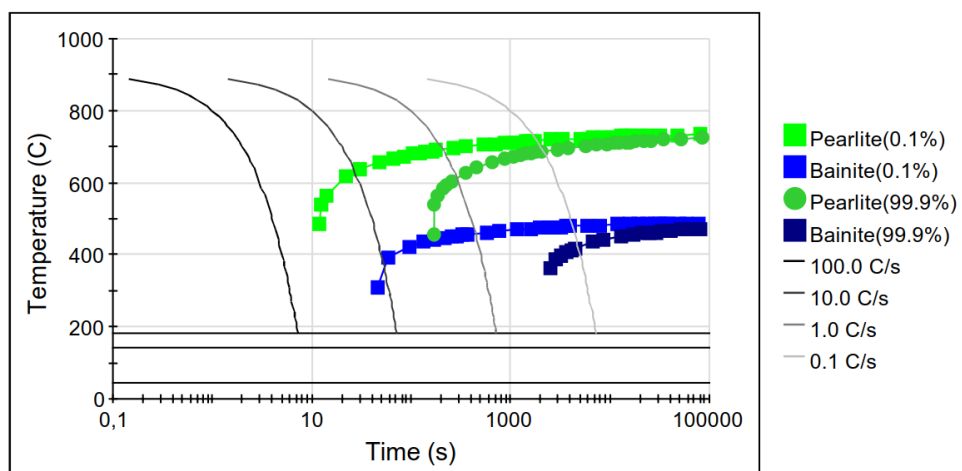
TTT



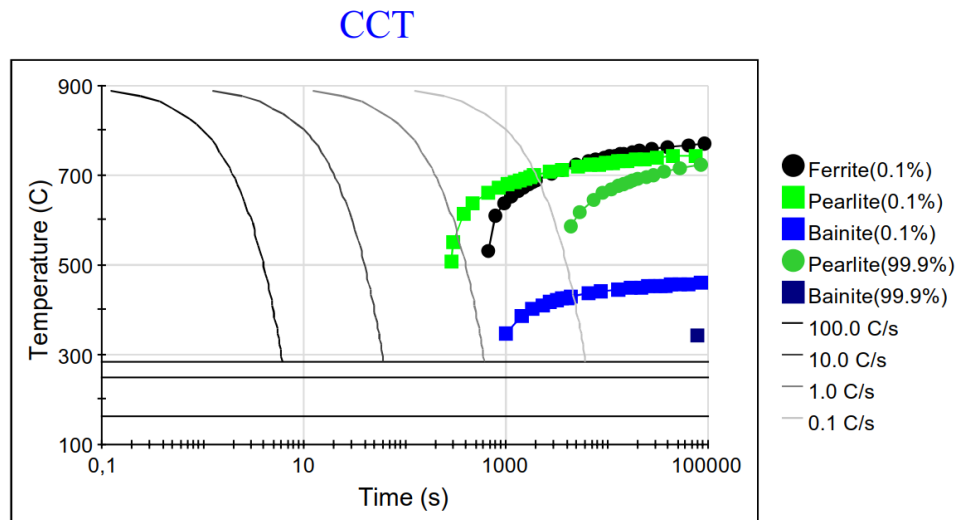
Kuva 13. J6-teräksen logaritminen TTT-diagrammi.

CCT-diagrammilla voidaan tehdä samat johtopäätökset kuin TTT-diagrammilla: boori vaikuttaa merkittävästi teräksen karkenevuuteen. CCT-diagrammi on kuitenkin käytännöllisempi karkenevuuden mittausta varten, sillä kuten Jominkykokeissa, CCT-diagrammissa otetaan huomioon jatkuva jäähtyminen. Kuvassa 14 on esitettyä P-seoksen CCT-diagrammi ja kuvassa 15 on J6-seoksen CCT-diagrammi. P-seoksessa bainiittia muodostuu 20,0 °C/s jäähdytysnopeudella ja perliittia vielä noin 85,0 °C/s jäähdytysnopeudella. Martensiitin muodostaminen on P-seoksella äärimmäisen hankalaa, sillä siihen tarvittaisiin yli 85,0 °C/s jäähdytysnopeus. J6-seoksella perliittia muodostuu 2,0 °C/s jäähdytysnopeudella ja bainiittia alle 1,0 °C/s jäähtymisnopeudella. J6-seoksella martensiittia saadaan aikaan 40 kertaa hitaammalla jäähtymisnopeudella kuin P-seoksella.

CCT



Kuva 14. P-seoksen logaritminen CCT-diagrammi.

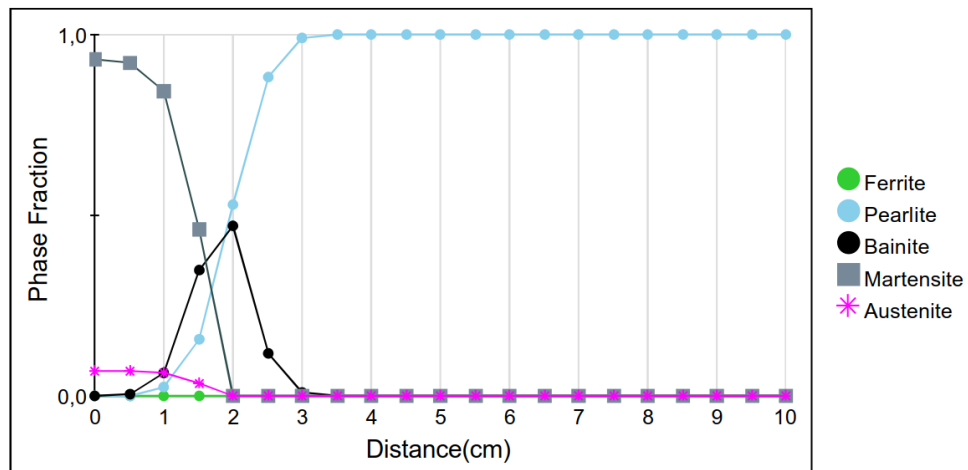


Kuva 15. J6-seoksen logaritminen CCT-diagrammi.

4.2 Jominykokeet

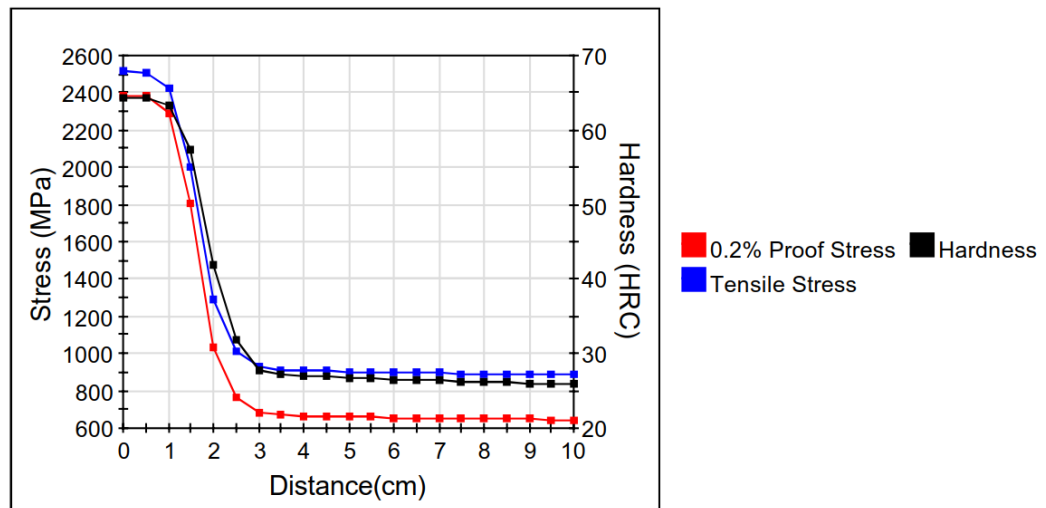
JMatPro-ohjelma käyttää ASTM-standardia, joten Jominykokeet suoritetaan ASTM A255 -standardin mukaisesti. JMatPro-ohjelmaan syötettiin seokset P ja J6, joista tuloksena tuli ennakoitu kuvaaja terästen käyttäytymisistä Jominykokeissa. Kuvat 16 ja 17 esittävät P-seosteisen teräksen Jominykoetta, joista ensimmäisessä kuvassa on keskitytty teräksen faasiosuuksiin kullakin etäisyydellä ja jälkimmäisessä kuvassa on tarkoitus esittää kovuuden muutos etäisyyden funktiona. Kuvassa 16 näkyy jäähdytysnopeuden ylittävän teräksen pinnalla 85,0 °C/s. Sentin syvyydessä martensiitin osuus alenee 90 %:iin, jolloin mikrorakenteeseen on muodostunut stabiileja faaseja. 1.5 cm syvyydellä martensiitin osuus on 50 %, mikä tarkoittaa, että P-seoksen D_{crit} on 1.5 cm. Kahden sentin syvyydellä martensiittia ei ole kerennyt muodostumaan, vaan mikrorakenteeseen on muodostunut perliittiä ja bainiittia. Lopulta syvemmällä teräksessä jäähdytysnopeus alenee niin pieneksi, että perliittireaktio ehtii loppua ennen bainiitin syntymistä, joten jäljelle jää vain perliittiä. Kuvasta 17 voidaan hahmottaa kovuuden muutos faasimuutosten mukaan kuvan 16 suhteen. Martensiitin vallitessa teräksellä on korkea kovuus, joka laskee rajusti martensiitin hävitessä ja perliitin kasvaessa.

Jominy Hardenability



Kuva 16. *P-seoksen faasiosuudet Jominykokeessa.*

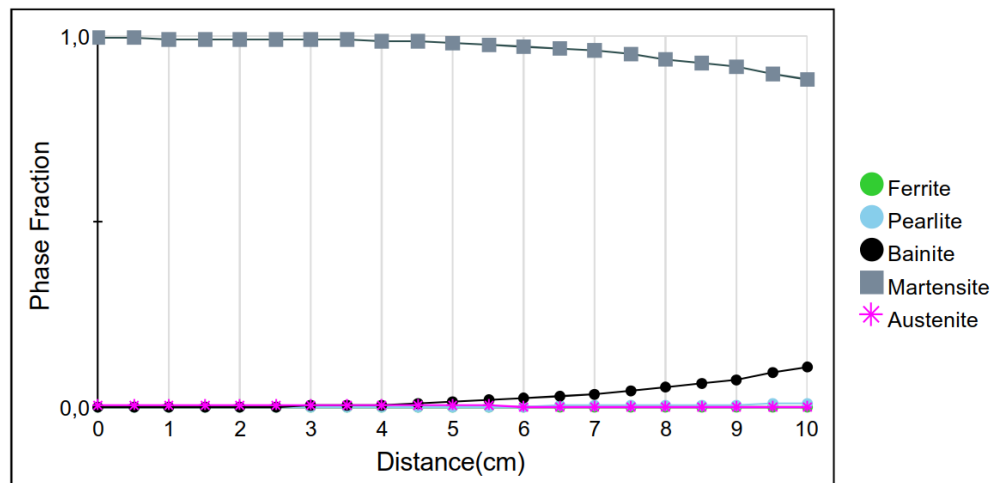
Jominy Hardenability



Kuva 17. *P-seoksen kovuudet näennäisen testikappaleen (kuva 11) eri kohdissa.*

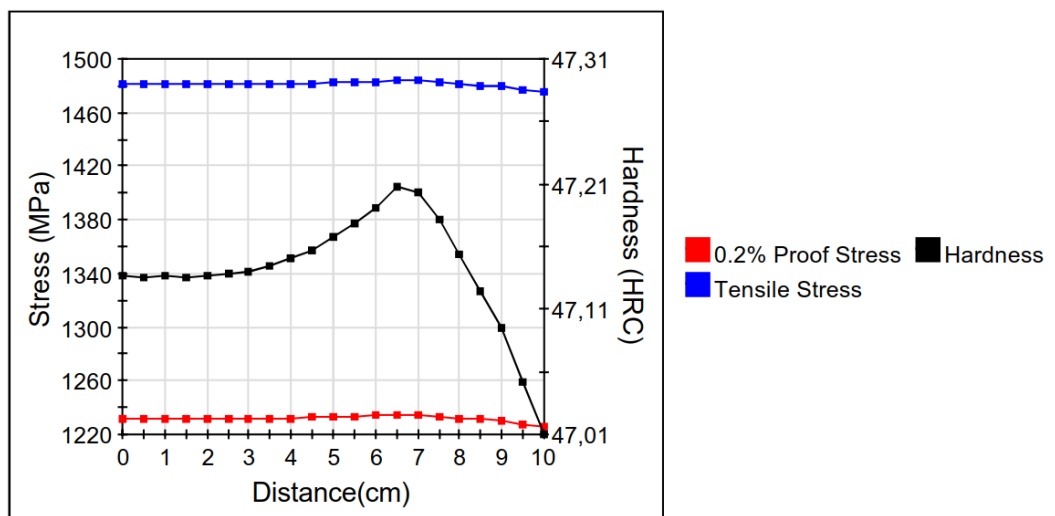
Kuvissa 18 ja 19 on samalla tavalla esitettyä Jominykoe J6-seokselle. Kuvasta 18 nähdään, että teräs on yli 50 % martensiittia kaikkialta. J6-seoksen D_{crit} on siten yli 10 cm. Bainiittia alkaa muodostumaan hieman kuuden sentin jälkeen, mutta perliittiä ei kerkeä muodostumaan missään kohtaa. Tuloksista voidaan päätellä, että J6-seoksella on erinomainen karkenevuus. Kuvassa 19 näkyy J6-seoksen kovuudet eri kohdissa. Suuria muutoksia kovuudessa ei tapahdu. Kovuus laskee hieman, bainiittia alkaa muodostumaan. Kovuus kasvaa kuitenkin hieman ennen sitä. Tälle ilmiölle ei ole selitystä.

Jominy Hardenability



Kuva 18. J6-seoksen faasiosuudet Jominykokeessa.

Jominy Hardenability



Kuva 19. J6-seoksen kovuudet näennäisen testikappaleen (kuva 11) eri kohdissa.

5. YHTEENVETO

Ratakiskoille tarvitaan uudistuksia perinteisten perliittikiskojen tilalle. Vaihtoehtoisia bainiitti- ja martensiittikiskoja on tutkittu. Bainiitti ja martensiitti ovat perliittiä kovempia mikrorakenteita, mikä antaisi siten paremman kulumiskestävyuden. Bainiittia ja martensiittia saadaan aikaan karkaisulla. Karkenevuus kertoo, kuinka helposti martensiittia syntyy karkaisun aikana, johon vaikuttaa monet tekijät, kuten boori. Tämä opinnäytetyö keskittyi juurikin boorin vaikutukseen karkenevuudessa.

JMatPro-ohjelmalla suoritettiin Jominykokeita ja piirrettiin TTT- ja CCT-diagrammeja. P-seoksen karkenevuus ei ollut kovin hyvä, kun taas J6-seoksen karkenevuus oli erinomainen. Suurin vaikuttaja J6-seoksessa oli boori, jonka vaikutus on todettu merkittäväksi useassa tieteellisessä tutkimuksessa. Kun bainiittisia ja martensiittisia ratakoja valmistetaan enemmän tulevaisuudessa, tulisi ne tehdä booriteräksistä. Karkaisu tulisi huomattavasti helpommaksi.

LÄHTEET

- [1] Ki Myung Lee, Andreas A. Polycarpou, Wear of conventional pearlitic and improved bainitic rail steels, *Wear*, Vol 259, Iss 1–6, 2005, pp. 391-399.
- [2] J. Hyvärinen, Radan päällysrakenteen kunnonhallinnan kehittäminen, Hämeen ammattikorkeakoulu, 2013. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/64249/Hyvarinen_Jakke.pdf?sequence=1
- [3] C. E. Pitt, Wear and microstructure relationships in carbide-free bainitic rail steels, 1999, http://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2012/Pitt_Thesis.pdf
- [4] K. Sawley, J. Kristan, Development of bainitic rail steels with potential resistance to rolling contact fatigue, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 26, Iss. 10, 2003, pp. 1019-1029.
- [5] Bhadeshia, H K D H, R.W.K. Honeycombe, *Steels: Microstructure and Properties: Fourth Edition*, *Steels: Microstructure and Properties: Fourth Edition*, 2017, pp. 1-461.
- [6] A.K. Bhargava, M.K. Banerjee, Hardenability of Steel, in: Anonymous (ed.), *Comprehensive Materials Finishing*, 2016, pp. 50-70.
- [7] S. Meskanen, P. Toivonen, Valimotekniikan perusteet, *ValuAtlas*. http://www.valu-atlas.fi/tietomat/docs/vtp_sulatus_metallurgia.pdf
- [8] U.P. Singh, B. Roy, S. Jha, S.K. Bhattacharyya, Microstructure and mechanical properties of as rolled high strength bainitic rail steels, *Materials Science and Technology*, Vol.17, Iss.1, 2001, pp.33-38.
- [9] G. Totten, A. Sverdlin, H. Tensi, C. Wu, S. Babu, B. Liscic, J. Grosch, D. Pye, M. Narazaki, E. Essadiqi, A. Padilha, J. Newkirk, R. Plaut, G. Liu, S. Thakur, A. Stich, P. Rios, A. Ness, *Steel Heat Treatment*, Boca Raton: CRC Press 2006).
- [10] A. Kapito, W. Stumpf, and M.J. Papo, The role of alloying elements in bainitic rail steels, *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2013.
- [11] Y.J. Li, D. Ponge, P. Choi, D. Raabe, Segregation of boron at prior austenite grain boundaries in a quenched martensitic steel studied by atom probe tomography, *Scripta Materialia*, Vol. 96, Iss. C, 2015, pp. 13-16. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84927738717&doi=10.1016%2fj.scrip-tamat.2014.09.031&partnerID=40&md5=445f8b8c4943c026a0f6a80c98fe2c70>.

- [12] Effects of cooling rate, austenitizing temperature and austenite deformation on the transformation behavior of high-strength boron steel, in: Materials Science and Engineering: A, 2012, pp. 214-224.
- [13] Dissolution and precipitation behaviors of boron bearing phase and their effects on hardenability and toughness of 25CrMoNbB steel, in: Materials Science and Engineering: A, 2017, pp. 45-55.
- [14] S. Kivivuori, S. Härkönen, Lämpökäsittelyoppi 3. painos 2004.
- [15] ASTM A255-99, Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [16] V. Nurmi, JMatPro-ohjelman käyttö teräksen ominaisuuksien arvioinnissa, kandidaatintyö, 2016.